

Studi Karakteristik Pola Aliran *Stratified* pada Pipa Horizontal 16 mm

Ilham Dwi Arirohman^{1*}, Fajar Paundra², Putty Yunesti¹

¹ Program Studi Teknik Sistem Energi, Jurusan Teknologi Produksi dan Industri, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung 35365

² Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknologi Produksi dan Industri, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung 35365

* Corresponding email: ilham.arirohman@tse.itera.ac.id

Riwayat Artikel

Diterima
12/07/2021
Disetujui
25/07/2021
Diterbitkan
31/07/2021

Abstrak

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mencari informasi mengenai karakteristik aliran stratified air-udara pada pipa kecil horizontal. Secara eksperimental karakteristik aliran stratified searah horizontal pada pipa akrilik berdiameter 16 mm dan panjang 10 m diteliti dengan metode konduktansi dan visual. Parameter studi berupa ketebalan film cairan dari sensor parallel wire didukung dengan data visual yang diambil dengan menggunakan high speed video camera pada daerah fully developed (180-210D). Untuk mendapatkan hasil pengamatan yang mencakup semua sub pola aliran stratified, dibuatlah variasi kecepatan superficial air (J_L) dari 0,01 – 0,1 m/s dan kecepatan superficial udara (J_G) dari 4 – 20 m/s. Sub pola aliran yang teramati kemudian dipetakan dalam peta sub pola aliran berdasarkan variasi kecepatan superficial udara dan air melengkapi database dari penelitian sebelumnya. Selain itu juga diketahui bahwa tebal film cairan merata menurun terhadap kenaikan J_G namun meningkat terhadap kenaikan J_L . Sementara kecepatan gelombang antarmuka meningkat seiring meningkatnya J_G dan J_L .

Kata Kunci: Aliran *stratified*, tebal *film*, *parallel wire*, gelombang antarmuka, kecepatan superficial.

Abstract

The main objective of this research is to find information about the characteristics of air-water stratified flow in a small horizontal pipe. Experimentally, the characteristics of horizontal co-current stratified flow in 16 mm diameter and 10 m long acrylic pipe were investigated by using conductance method and visual method. The study parameter in the form of liquid film thickness measured using a developed parallel wire sensor is supported by visual data taken using a high speed video camera in the fully developed area (180-210D). In order to obtain observations covering all stratified flow subpatterns, a variation of the superficial velocity of water (J_L) from 0.01 – 0.1 m/s and the superficial velocity of air (J_G) from 4 – 20 m/s were chosen. The observed flow sub-patterns are then mapped in a flow sub-pattern map based on variations in the superficial velocity of air and water, adding the database from previous studies. In addition, it is also known that the average liquid film thickness decreases as J_G increases but it increases as J_L increases, while the interfacial wave velocity increases with increasing J_G and J_L .

Keywords: Stratified flow, film thickness, parallel wire, interfacial wave, superficial velocity.

1. Pendahuluan

Aliran dua fase adalah suatu fenomena yang melibatkan dua fluida yang mengalir secara simultan dalam sebuah konduit atau pipa. Dalam dunia industri, khususnya yang menggunakan jaringan sistem perpipaan, seperti pada perminyakan, *heat exchanger*, dan *hotleg steam generator* pada pembangkit energi sering kali dijumpai jenis aliran dua fase ini.

Aliran dua fase memiliki perilaku sifat dan karakteristik yang berbeda dengan aliran satu fase[1]. Aliran dua fase memiliki beberapa rezim aliran yang biasa disebut sebagai pola aliran. Pola aliran dalam suatu pipa sangat memengaruhi kondisi operasi khususnya faktor keamanannya. Ada pola aliran yang aman untuk suatu sistem

perpipaan namun ada juga pola aliran yang dihindari karena dapat menyebabkan osilasi bahkan *blasting* pada pipa. Pola aliran dua fase dipengaruhi oleh banyak parameter seperti bentuk dan dimensi pipa, viskositas fluida, densitas fluida, gravitasi, sudut kemiringan pipa, kecepatan aliran fluida, dan tegangan permukaan [1].

Salah satu pola aliran dua fase adalah aliran *stratified*. Ciri utama dari pola aliran ini adalah adanya stratifikasi yang menggambarkan dengan jelas batas antara kedua fase fluida. Pada pipa horizontal fase dengan massa jenis lebih besar akan mengalir di bagian bawah pipa, sementara fase lainnya akan mengalir di atasnya. Aliran *stratified* yang terbentuk pada sistem perpipaan memiliki fluktuasi tekanan relatif kecil. Namun,

transisi aliran *stratified* ke aliran *slug* patut menjadi perhatian karena aliran *slug* memiliki fluktuasi tekanan sangat besar yang memungkinkan terjadi *blasting* pada pipa [2].

Dalam memudahkan pemahaman akan pengaruh faktor-faktor yang memengaruhi pola aliran dua fase, peneliti-peneliti terdahulu telah memetakan pola aliran dua fase. Namun karena faktor yang memengaruhi pola aliran dua fase sangat banyak, suatu peta pola aliran terkadang tidak mencakup ukuran pipa dan kondisi operasi aliran yang diinginkan khususnya, oleh karena itu dibutuhkan data yang banyak mengenai aliran dua fase dari hasil-hasil eksperimen pada berbagai variasi parameter. Penelitian ini dilakukan untuk menambahkan informasi terkait sub pola aliran *stratified* pada pipa kecil horizontal.

Penelitian sebelumnya tentang studi karakterisasi pada saluran berbentuk kotak dengan tinggi 50 mm dan lebar 40 mm untuk sub pola aliran *stratified* yang dilakukan oleh Bae, dkk. (2017) menyimpulkan bahwa meningkatnya bilangan Reynolds gas dan likuid menyebabkan kecepatan gelombang antarmuka meningkat [3]. Menurut penelitian lain pada sub pola aliran *stratified* yang sama, bertambahnya kecepatan udara memang akan meningkatkan kecepatan gelombang antarmuka [4]. Hasil ini juga didukung oleh penelitian Hudaya, dkk. (2019) yang melaporkan bahwa rasio antara bilangan Reynolds dan parameter Martinelli sangat memengaruhi persamaan korelasi frekuensi, amplitudo, dan kecepatan gelombang antarmuka [5]. Ayati, dkk. (2018) melakukan analisis statistik pada *interfacial wave* aliran *stratified* gas-liquid pada pipa horizontal. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa gelombang dapat diklasifikasikan menjadi dua regime, yaitu 1) Quasi-Gaussian atau quasi-linier, 2) Non-Gaussian atau non-linear [6].

Metode pengukuran parameter aliran dua fase telah banyak dikembangkan, salah satu yang sering digunakan adalah metode konduktansi. Metode ini sendiri memanfaatkan sifat konduktivitas listrik dari fluida, salah satunya dengan menggunakan sensor kawat sejajar [2]. Secara teori, nilai hambatan listrik dipengaruhi nilainya oleh ketebalan film cairan yang mengisi antara kedua kawat. Oleh sebab itu, semakin banyak cairan yang mengisi celah antar kawat, maka hambatan listriknya akan semakin kecil. Beda tegangan DC yang terukur kemudian dikonversi menjadi ketebalan film cairan sesaat.

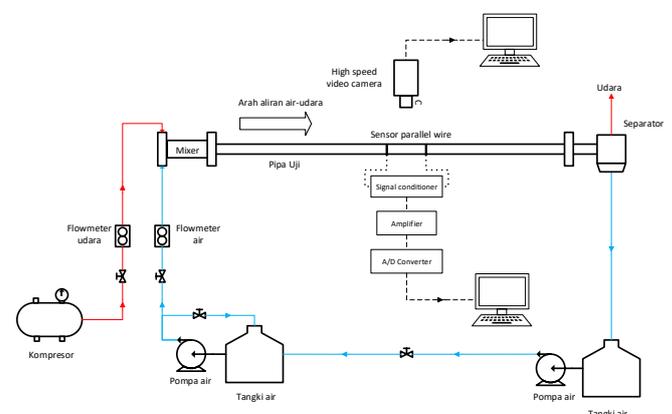
Metode konduktansi dengan menggunakan kawat sejajar ini awalnya diperkenalkan oleh Brown, dkk. (1978). Probe kawat berbahan platina berdiameter 0,06 mm dan jarak antar kawat 3 mm. Probe ini digunakan untuk mendeteksi gelombang gangguan pada aliran *annular downward* dan mengukur ketebalan film cairan [7]. Arirohman, dkk. (2019) menggunakan metode ini untuk mempelajari

perilaku aliran *stratified* pada pipa horizontal berdiameter 26 mm, metode ini juga digunakan untuk mengkarakterisasi pola aliran *wavy*, *slug*, dan *stratified*, pada pipa *hotleg* dengan diameter 25,4 mm oleh Badaruddin, dkk. (2018) serta untuk mengukur ketebalan *circumferential film* cairan pada pipa 26 mm oleh Deendarlianto, dkk. (2019) [2], [8], [9]. Hal ini menunjukkan bahwa metode ini cukup banyak digunakan dan fleksibel untuk mengukur ketebalan film cairan. Koskie, dkk. (1989) juga melaporkan bahwa kinerja sensor *parallel wire* sangat baik untuk mengukur ketebalan film cairan di atas 1 mm [10].

Tujuan utama penelitian ini adalah mencari informasi mengenai karakteristik aliran *stratified* air-udara pada pipa horizontal dengan ukuran diameter dalam 16 mm dan panjang 10 m. Parameter studi meliputi ketebalan film cairan, visualisasi aliran, dan kecepatan gelombang antarmuka.

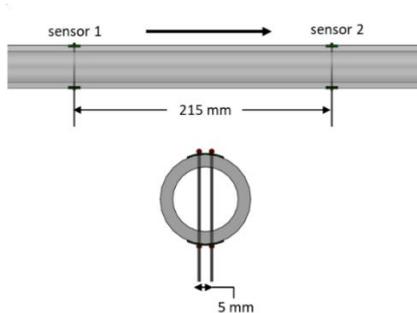
2. Metode

Eksperimen dilakukan di Fasilitas Riset Aliran Dua Fase, Laboratorium Mekanika Fluida, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Eksperimen dilakukan pada kondisi atmosferik. Bahan utama yang digunakan adalah fluida cair berupa air dan fluida gas berupa udara. Fluida air dialirkan ke dalam seksi pipa uji menggunakan pompa, sementara fluida udara dialirkan ke dalam pipa uji dengan tekanan dari kompresor. Gambar 1 menunjukkan skema dari alat uji. Fluida udara dan air masuk ke pipa uji melalui *mixer*. Pengambilan data visual pola aliran dua fase pada pipa uji menggunakan *high speed video camera* Phantom Miro M310, sementara data ketebalan *film* cairan diperoleh dari sensor *parallel wire*. Fluida air dan udara kemudian dipisahkan pada separator. Air dari separator dialirkan ke tangki *outlet* untuk diumpungkan kembali ke tangki *inlet*, sementara udara dibiarkan lepas ke atmosfer.



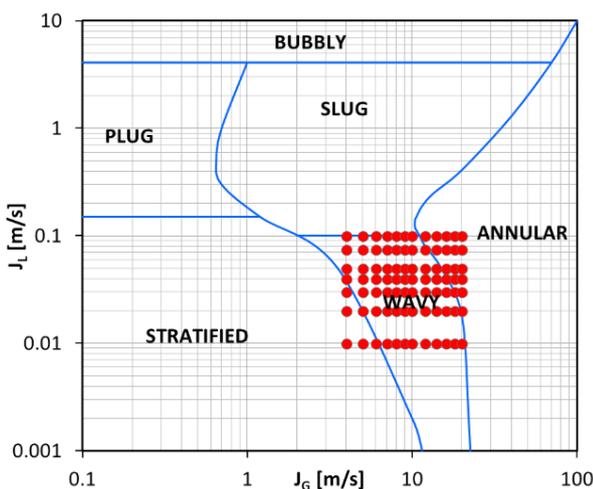
Gambar 1. Skema Alat Uji

Terdapat dua sensor *parallel wire* yang digunakan pada penelitian ini. Sensor *parallel wire* adalah sepasang kawat sejajar dengan bahan tembaga lapis perak berdiameter 0,51 mm dengan jarak antar kawat 5 mm. Pemasangan sensor diatur berjajar dengan jarak 215 mm pada arah longitudinal pipa uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Sinyal keluaran sensor dialirkan ke *signal conditioner* yang disuplai dengan tegangan eksternal 12 VDC, kemudian sinyal dari *signal conditioner* diumpankan ke *amplifier*. Sinyal analog tersebut lalu dikoversi menjadi sinyal digital dengan *A/D converter*. Frekuensi sampling data yang digunakan sebesar 500 sampling/sekon.



Gambar 2. Pemasangan sensor pada pipa

Dalam penelitian ini, variabel bebas yang dipilih adalah kecepatan superfisial air (J_L) dan kecepatan superfisial udara (J_G). Kecepatan superfisial udara divariasikan antara 4-20 m/s dan kecepatan superfisial air divariasikan antara 0,01-0,1 m/s. Pengukuran variabel kecepatan superfisial ini dilakukan secara diskrit sebanyak 72 titik data pada peta pola aliran Mandhane dan Lin Hanratty [11], [12] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Titik pengambilan data penelitian

Data sinyal tegangan dari rangkaian sensor kemudian diolah menggunakan interpolasi *piecewise Langrange* menjadi data ketebalan *film* cairan. Kecepatan gelombang antarmuka kemudian dihitung dengan Persamaan 1 berikut.

$$c_w = \frac{0,215}{t_{lag}} \tag{1}$$

Dengan c_w adalah kecepatan gelombang antarmuka (dalam m/s) dan t_{lag} adalah waktu *lagging* sinyal sensor 2 dari sensor 1 (dalam sekon). Waktu *lagging* sinyal dari kedua sensor dapat dihitung dengan teknik *cross correlation* menggunakan *time series* data dari sensor 1 dan 2. Fungsi *cross correlation* dari time series $x(t)$ dan $y(t)$ diberikan oleh Persamaan 2 :

$$R_{xy}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)y(t + \tau)d\tau \tag{2}$$

Dimana: t adalah waktu *lagging* antara dua sinyal.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Visualiasi aliran dan ketebalan film cairan sesaat

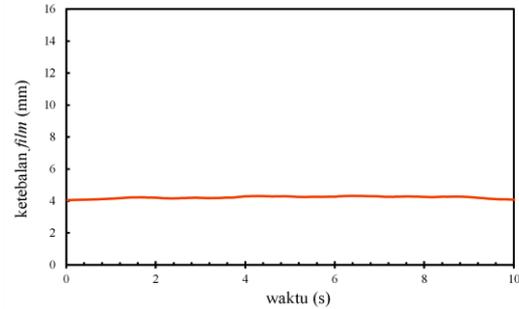
Pola aliran dua fase pada pipa horizontal berbeda-beda, tergantung salah satunya pada kecepatan superfisial fluida. Secara visual aliran dua fase pada pipa horizontal dapat dibedakan menjadi enam pola aliran, yaitu aliran *stratified smooth*, *stratified wavy*, *plug*, *slug*, *annular*, dan *dispersed bubble* [13]. Lebih detail lagi Chen, dkk (1997) membagi pola aliran *stratified wavy* menjadi 4 sub pola aliran, yaitu aliran *stratified 2D wave*, *stratified 3D wave*, *stratified roll wave*, dan *entrained droplet* [14].

Kajian penelitian ini difokuskan pada karakteristik tebal film cairan dan kecepatan gelombang antarmuka pada sub pola aliran *stratified* yang terbentuk pada pipa kecil horizontal berdiameter 16 mm. Hasil pengamatan visual terhadap sub pola aliran *stratified* yang terbentuk, dirangkum pada peta sub pola aliran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

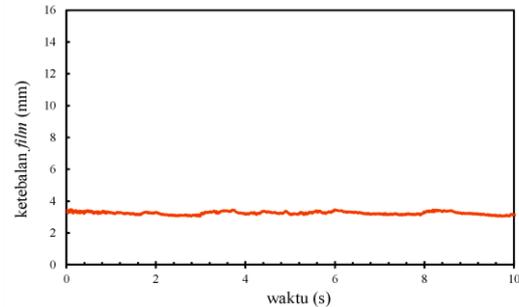
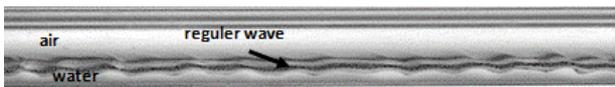
Data visual masing-masing sub pola aliran serta karakteristik tebal film cairan kemudian diberikan pada Gambar 4.a-f. Pada Gambar 4.a menunjukkan aliran *stratified smooth* dengan ciri utama batas *interfacial* antar fase yang relatif datar dan stabil (*smooth interface*). Hasil pengukuran tebal film cairan juga menunjukkan hal yang sama dengan hasil visual, grafik tebal *film* cenderung stabil tidak berubah terhadap waktu berbentuk garis datar (*flat line*). Sub pola aliran *stratified smooth* teramati pada J_L dan J_G yang rendah.

Seiring peningkatan J_G , mulai muncul gangguan pada batas *interface* akibat adanya *interfacial instability*, yakni ketidakseimbangan antara energi angin yang ditransfer ke batas *interface* dengan disipasi viskos [15]. Gambar 4.b menunjukkan sub pola aliran *stratified 2D wave*. Sub pola aliran ini dicirikan dengan adanya gelombang antarmuka yang teratur dengan amplitudo yang relatif kecil dan seragam pada batas *interface* antara air dan udara.

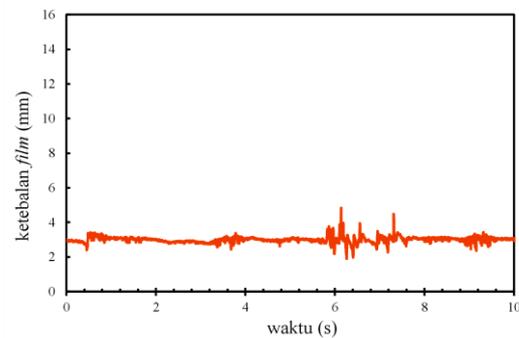
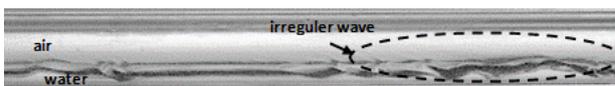
Pada Gambar 4.c menunjukkan sub pola aliran bergeser menjadi *stratified 3-D wave* ketika kecepatan superficial air dan/atau udara dinaikkan, ciri sub pola aliran ini gelombang antarmuka yang terbentuk tak beraturan baik amplitudo dan panjang gelombangnya. Pada pola aliran ini *wave spreading effect* terjadi, yaitu fase cair menyebar naik pada bagian dalam dinding pipa sehingga membentuk kurva pada batas *interface* yang dekat dinding [14].



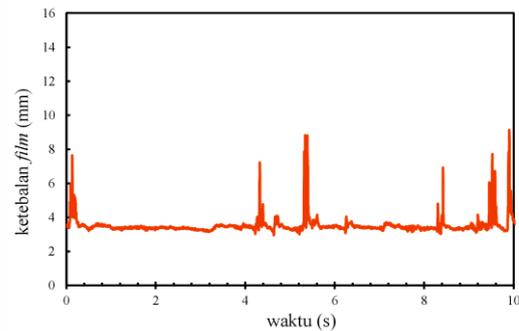
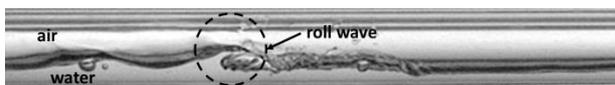
a. *stratified smooth* ($J_G = 4 \text{ m/s}$, $J_L = 0,02 \text{ m/s}$)



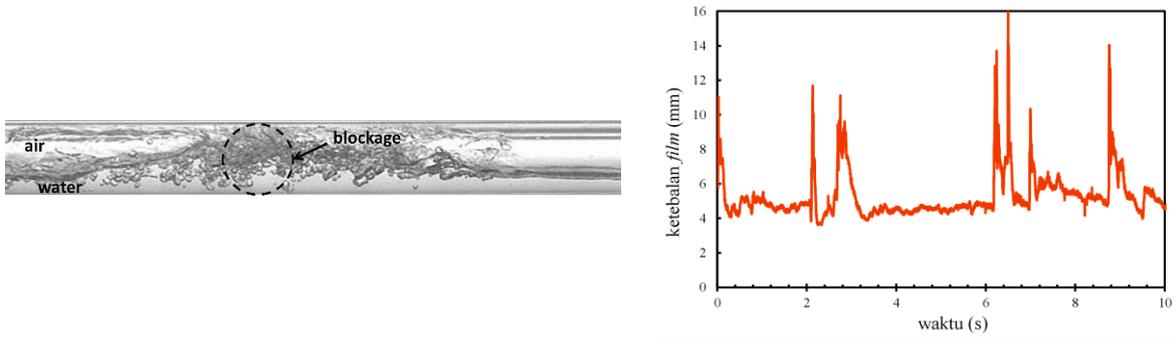
b. *stratified 2D wave* ($J_G = 7 \text{ m/s}$, $J_L = 0,02 \text{ m/s}$)



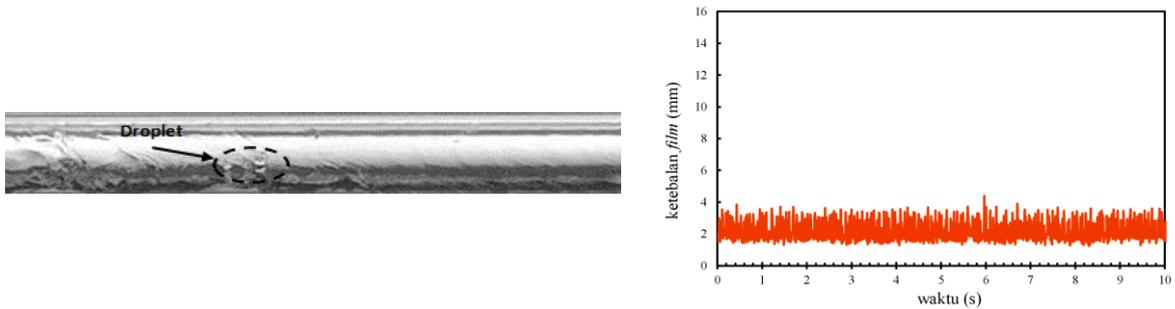
c. *stratified 3D wave* ($J_G = 9 \text{ m/s}$, $J_L = 0,03 \text{ m/s}$)



d. stratified roll wave ($J_G = 5 \text{ m/s}$, $J_L = 0,075 \text{ m/s}$)



e. Pseudo-Slug ($J_G = 4 \text{ m/s}$, $J_L = 0,1 \text{ m/s}$)



f. Entrained droplet ($J_G = 14 \text{ m/s}$, $J_L = 0,075 \text{ m/s}$)

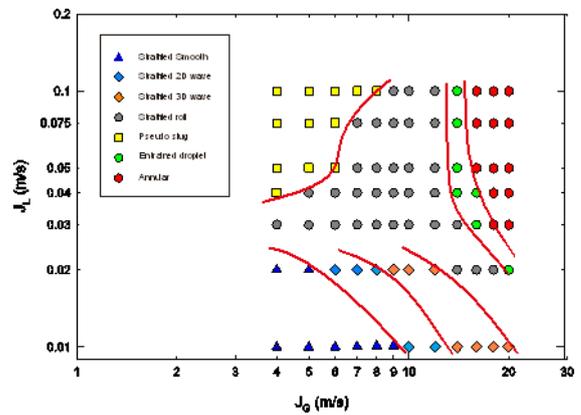
Gambar 4. Grafik ketebalan film cairan dan visualisasi sub pola aliran stratified

Lebih lanjut, seiring meningkatnya kecepatan superfisial udara dan/atau air sub pola aliran stratified 3-D wave berganti menjadi sub pola aliran stratified roll wave. Dicirikan adanya gelombang antarmuka yang menggulung. Gambar 4.d menunjukkan sub pola aliran stratified roll wave. Kurva tebal film cairan menunjukkan amplitudo gelombang pada sub pola aliran stratified roll wave lebih besar daripada sub pola aliran stratified 3-D wave.

Peneliti lain mengusulkan sub pola aliran pseudo-slug [12]. Puncak gelombang pada sub pola aliran ini dapat mencapai dinding dalam bagian atas pipa dan menyebabkan blockage sesaat pada aliran udara. Adanya blockage pada aliran udara menyebabkan gradien tekanan aliran ini cukup besar dibandingkan sub pola aliran lainnya. Hydraulic jump sering dijumpai pada sub pola pseudo-slug dan nilai tebal cairan bisa mencapai diameter pipa. Sub pola aliran ini merupakan rezim transisi aliran stratified ke aliran slug. Gambar 4.e adalah visualisasi dan kurva tebal film cairan dari aliran ini.

Gambar 4.f adalah sub pola aliran entrained droplet. Aliran ini adalah daerah transisi aliran stratified ke aliran annular, ciri utamanya adalah adanya droplet cairan yang terlepas dari batas interface dan terbawa aliran udara. Aliran ini teramati pada kecepatan superfisial udara lebih

dari 14 m/s dan kecepatan superfisial air lebih dari 0,02 m/s.



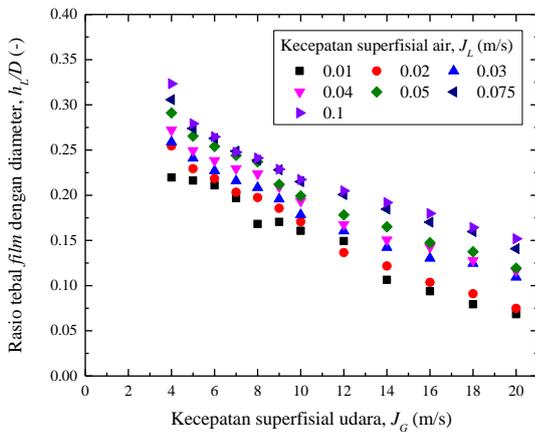
Gambar 5. Peta sub pola aliran stratified pada pipa 16 mm

3.2. Ketebalan film cairan rerata dan kecepatan gelombang antarmuka

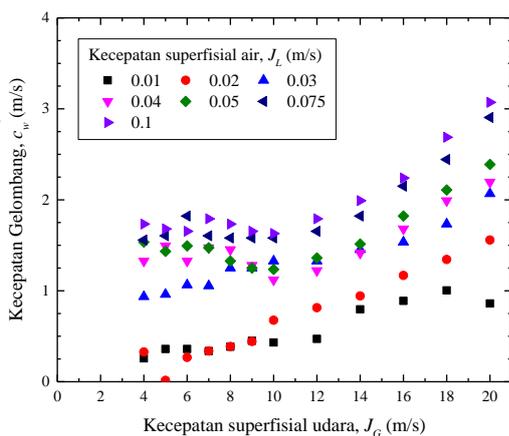
Ketebalan film cairan pada setiap sub pola aliran yang diperoleh dari sensor parallel wire merupakan nilai sesaat yang merupakan fungsi waktu. Untuk memperoleh informasi representatif dari masing-masing sub pola aliran perlu dihitung nilai rata-rata tebal film cairan selama 10 detik.

Gambar 6 menunjukkan ketebalan *film* cairan rerata sub pola aliran *stratified* terhadap perubahan kecepatan superfisial air dan udara. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kenaikan kecepatan superfisial udara menyebabkan tebal *film* cairan rerata menurun. Ketebalan rerata berkurang karena desakan udara terhadap batas *interface* menyebabkan sebagian volume air menyebar dan menaiki dinding dalam pipa. Lebih lanjut, saat kecepatan superfisial udara terus dinaikkan, pola aliran *stratified* akan berganti. Seluruh dinding dalam pipa akan tertutupi cairan. Lapisan cairan ini membentuk lingkaran likuid seperti cincin anulus dengan aliran udara mengalir di tengahnya. Pola aliran ini disebut sebagai pola aliran *annular*.

Sementara itu, hal sebaliknya jika kecepatan superfisial air dinaikkan, ketebalan *film* cairan rerata akan meningkat. Hal ini dikarenakan *volume discharge* fase likuid dari *mixer* menjadi bertambah.



Gambar 6. Pengaruh kecepatan superfisial terhadap ketebalan *film* cairan rerata



Gambar 7. Pengaruh J_L dan J_G terhadap kecepatan gelombang antarmuka

Gambar 7 memperlihatkan hubungan antara kecepatan superfisial air dan udara dengan kecepatan gelombang antarmuka. Dari grafik terlihat bahwa meningkatnya kecepatan superfisial

air dan udara menyebabkan bertambahnya kecepatan gelombang antarmuka. Hasil ini sejalan dengan apa yang telah dilaporkan peneliti sebelumnya [3]. *Interfacial instability* dan peningkatan *volume discharge* cairan menjadi faktor utama dalam hal ini. Namun, kecenderungan yang sedikit berbeda terlihat pada $J_L = 0,075$ m/s dan 0,1 m/s. Pada nilai $J_G = 4$ m/s, kecepatan gelombang menurun terhadap peningkatan J_G , kemudian saat nilai $J_G = 6$ m/s kecepatan gelombang antarmuka mulai meningkat terhadap kenaikan J_G . Pada kondisi ini terbentuk sub pola aliran *pseudo-slug* dimana kecepatan gelombang antarmuka cukup tinggi akibat adanya *blockage* aliran udara sehingga gradien tekanan naik antara depan dan belakang gelombang dan mendorong badan gelombang di depannya.

4. Kesimpulan

Pengamatan secara visual terhadap karakteristik aliran *stratified* pada pipa akrilik horizontal ukuran diameter 16 mm dan panjang 10 m telah dilakukan dengan menggunakan *high speed video camera* Miro Phantom M310. Parameter ketebalan *film* cairan diukur dengan menggunakan metode konduktansi dengan sensor *parallel wire*. Karakteristik ketebalan *film* cairan rerata menurun seiring meningkatnya kecepatan superfisial udara untuk semua sub pola aliran dan secara umum bertambah seiring meningkatnya kecepatan superfisial air. Sementara itu, peningkatan kecepatan superfisial udara dan air menyebabkan kecepatan gelombang antarmuka bertambah, kecuali pada sub pola aliran *pseudo-slug* dimana kecenderungan kecepatan gelombang antarmuka naik terhadap J_G pada nilai J_G rendah (4-6 m/s) lalu turun pada J_G (6-10 m/s) kemudian naik lagi seiring meningkatnya J_G . Hal ini dikarenakan adanya fenomena *blockage* pada aliran udara yang menyebabkan kenaikan gradien tekanan antara depan dan belakang gelombang.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada yang telah menyediakan fasilitas untuk penelitian ini.

Daftar Pustaka

[1] A. Rahmandhika, A. Saifullah, P. R. Ansyah, and A. Mokhtar, "Pengaruh Liquid Hold-Up terhadap Transisi Pola Aliran 2 Fasa Air-Udara dari Stratified Ke Slug pada Pipa 50 mm," *J. Sci. Appl. Technol.*, vol. 4, no. 2, p. 75, 2020, doi: 10.35472/jsat.v4i2.279.

[2] I. D. Arirohman and A. Z. Hudaya, "Perilaku Aliran Stratified Ditinjau dari Karakteristik Visual dan Tebal Film Cairan pada Pipa Horizontal," *J. Mech. Des. Test.*, vol. 1, no. 2, pp. 86–94, 2019, doi:10.22146/jmdt.v1i2.52810.

- [3] B. Bae, T. Ahn, J. Jeong, K. Kim, and B. Yun, "Characteristics of an interfacial wave in a horizontal air-water stratified flow," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 97, pp. 197–205, 2017, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.08.009.
- [4] A. Z. Hudaya, O. Dinaryanto, A. Widyatama, Indarto, and Deendarlianto, "Experimental study on interfacial friction factor of the air-water stratified two-phase flow in a horizontal pipe," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2001, 2018, doi: 10.1063/1.5049979.
- [5] A. Z. Hudaya, A. Widyatama, O. Dinaryanto, W. E. Juwana, Indarto, and Deendarlianto, "The liquid wave characteristics during the transportation of air-water stratified co-current two-phase flow in a horizontal pipe," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 103, no. January, pp. 304–317, 2019, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.01.021.
- [6] A. A. Ayati and J. N. E. Carneiro, "Statistical characterization of interfacial waves in turbulent stratified gas-liquid pipe flows," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 103, pp. 94–105, 2018, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.02.011.
- [7] R. C. Brown, P. Andreussi, and S. Zanelli, "The use of wire probes for the measurement of liquid film thickness in annular gas-liquid flows," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 56, no. 6, pp. 754–757, 1978, doi: 10.1002/cjce.5450560618.
- [8] A. Badarudin, A. Setyawan, O. Dinaryanto, A. Widyatama, Indarto, and Deendarlianto, "Interfacial behavior of the air-water counter-current two-phase flow in a 1/30 scale-down of pressurized water reactor (PWR) hot leg," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 116, pp. 376–387, 2018, doi: 10.1016/j.anucene.2018.03.007.
- [9] Deendarlianto, A. Z. Hudaya, Indarto, and K. D. Ozzilenda Soegiharto, "Wetted wall fraction of gas-liquid stratified co-current two-phase flow in a horizontal pipe with low liquid loading," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 70, no. August, p. 102967, 2019, doi: 10.1016/j.jngse.2019.102967.
- [10] J. E. Koskie, I. Mudawar, and W. G. Tiederman, "Parallel-wire probes for measurement of thick liquid films," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 15, no. 4, pp. 521–530, 1989, doi: 10.1016/0301-9322(89)90051-7.
- [11] Mandhane; G.A. Gregory; K. Aziz, "A flow pattern map for gas—liquid flow in horizontal pipe," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 1, no. 4, pp. 303–335, 1974.
- [12] P. Y. Lin and T. J. Hanratty, "Detection of slug flow from pressure measurements," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 13, no. 1, pp. 13–21, 1987, doi: 10.1016/0301-9322(87)90003-6.
- [13] Y. Taitel, N. Lee, and A. E. Dukler, "Transient gas-liquid flow in horizontal pipes: Modeling the flow pattern transitions," *AIChE J.*, vol. 24, no. 5, pp. 920–934, 1978, doi: 10.1002/aic.690240518.
- [14] X. T. Chen, X. D. Cai, and J. P. Brill, "Gas-liquid stratified-wavy flow in horizontal pipelines," *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME*, vol. 119, no. 4, pp. 209–216, 1997, doi: 10.1115/1.2794992.
- [15] N. Andritsos and T. J. Hanratty, "Interfacial instabilities for horizontal gas-liquid flows in pipelines," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 13, no. 5, pp. 583–603, 1987, doi: 10.1016/0301-9322(87)90037-1.